



УДК 536.242

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА С ПОМОЩЬЮ ТРУБ С НАКАТКОЙ

INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGER AT CONDENSATION OF STEAM WITH HELPS OF PIPES WITH KNURL WHEEL

Василевский Никита Сергеевич, магистрант каф. "Теплоэнергетика и теплотехника", Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: n_vasilevskiy@list.ru, Тел.: +7(919) – 38 – 11 – 763
Кувалдин Алексей Евгеньевич, магистрант каф. "Теплоэнергетика и теплотехника", Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Nikita S. Vasilevskiy, Master student, Department. "Heat power engineering and heat engineering", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia E-mail: n_vasilevskiy@list.ru, Phone: +7 (919) - 38 - 11 - 763

Alexey E. Kuvaldin, Master student, Department "Heat power engineering and heat engineering", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia.

Аннотация: В настоящее время наиболее часто используемым методом интенсификации теплоотдачи является оребрение поверхностей. Однако в случае конденсации водяных паров использование оребрения не является высокоэффективным способом. Использование накатки позволяет значительно увеличить интенсивность теплообмена, без увеличения теплообменной поверхности.

Abstract: At present, the most frequently used method for intensifying heat transfer is surface finning. However, in the case of condensation of water steam, the use of fins is not a highly efficient method. The use of knurl is allowed to significantly increase the intensity of heat transfer, without increasing the heat exchange surface.

Ключевые слова: теплообмен; конденсация; накатка.

Key words: heat exchanger; condensation; knurl wheel.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно высокие значения коэффициентов теплоотдачи обоих теплоносителей приводят к высокому коэффициенту теплопередачи, и относительно небольшими поверхностями

нагрева, однако теплообмен при конденсации определяется толщиной пограничного слоя (Рис. 1) – слоя конденсата – образовавшегося на трубках, в значительной степени уменьшающего коэффициент теплопередачи в этих процессах.

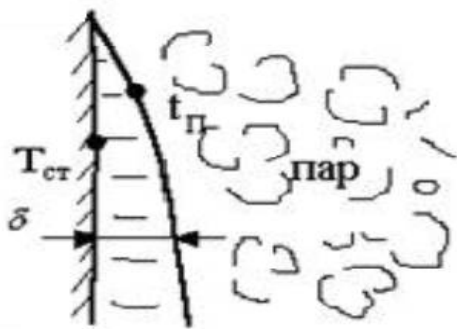


Рис. 1. Механизм влияния пленки конденсата на характеристики теплообмена.

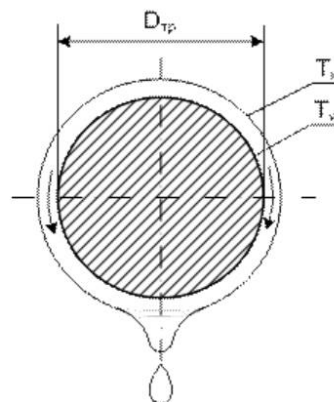


Рис. 2. Пленка конденсата на горизонтальной трубе

Пленка конденсата выступает в роли изоляционного материала. Чем толще слой

конденсата, тем менее эффективным становится теплообмена. Это приводит к увеличению

площади теплообмена. Подобный режим носит название пленочной конденсации.

Помимо пленочной конденсации возможно организация капельной конденсации в результате которой образующийся конденсат не образует плотной пленки на поверхности трубы, как результат коэффициент теплопередачи в меньшей степени будет зависеть от слоя конденсата.

Повышение коэффициента теплопередачи за счет формирования капельного режима конденсации позволит уменьшить поверхность теплообмена, сохраняя тепловой поток, и как следствие снизить металлоёмкость конструкции и капитальные затраты на УМВ.

При конденсации на горизонтальной гладкой трубе пленка конденсата полностью закрывает поверхность теплообмена (Рис. 2). При расчете теплообмена при конденсации со стороны конденсирующегося теплоносителя, направляемого в межтрубное пространство, коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по следующей формуле [1]:

$$\frac{1}{\alpha} = 0,7284 \sqrt{\frac{rg \rho_{жс}^2 \lambda_{жс}^3}{\mu_{жс}^2 (t_s - t_c) d}} \quad (1)$$

При расчёте коэффициента теплоотдачи теплоносителя, движущегося внутри трубок, необходимо определить режим течения жидкости. При ламинарном режиме движения жидкости в трубе ($Re < 2300$):



Рис. 3. Капельная конденсация на поверхности труб с накаткой

Если трубы размещены горизонтально, то образующаяся на них пленка конденсата стекает по наружной поверхности трубы поперек ее оси сверху вниз и внизу трубы срывается. Наличие переменного сечения наружной поверхности трубы с плавными переходами (см. Рис. 3) приводит к дополнительному стеканию конденсата в периодически размещенные канавки. Это приводит к уменьшению толщины пленки конденсата на выступающих частях трубы, что дает уменьшение термического сопротивления между паром и стенкой и увеличивает интенсивность теплообмена.

$$Nu = 4 \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (2)$$

При турбулентном режиме течения ($Re > 10000$):

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l \quad (3)$$

В переходных режимах приближенный расчёт можно провести по формуле:

$$Nu = A Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (4)$$

Где $A = f(Re, \mu)$

ТРУБНОЕ ПРОСТРАНСТВО

При пленочной конденсации эффект интенсификации теплообмена на наружной поверхности труб обусловлен действием поверхностного натяжения на пленку конденсата. Чем толще и равномернее пленка конденсата, тем больше ее термическое сопротивление. Поэтому для обеспечения существенной интенсификации теплообмена снаружи труб необходима такая геометрия (Рис. 3), которая обеспечивала бы эффективный срыв пленки конденсата или ее отекание в канавки с уменьшением ее толщины на остальных участках трубы, создавая приближение капельной конденсации.

Достигается это путем придания выступающей части трубы выпуклой формы и плавного сопряжения поверхностей канавок и выступающих частей трубы (Рис. 4) [2].

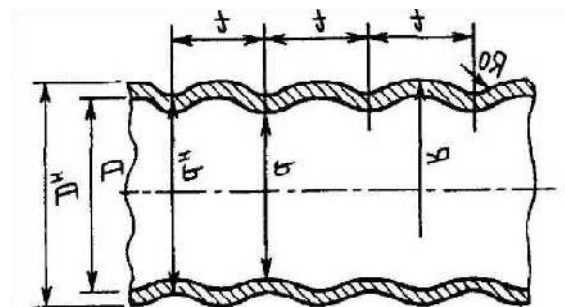


Рис. 4. Эскиз трубы, используемой при конденсации теплоносителей на наружной поверхности

Стекание конденсата в канавки с выступающих частей труб ускоряет их заполнение, снижает устойчивость пленки конденсата и ведет к ее срыву или ускоренному стеканию. Таким образом, искусственное перераспределение образующегося конденсата по длине трубы приводит к резкому увеличению теплообмена на выступающих частях трубы, составляющих ее большую часть, и в итоге обуславливает существенное возрастание среднего коэффициента теплоотдачи снаружи трубы.

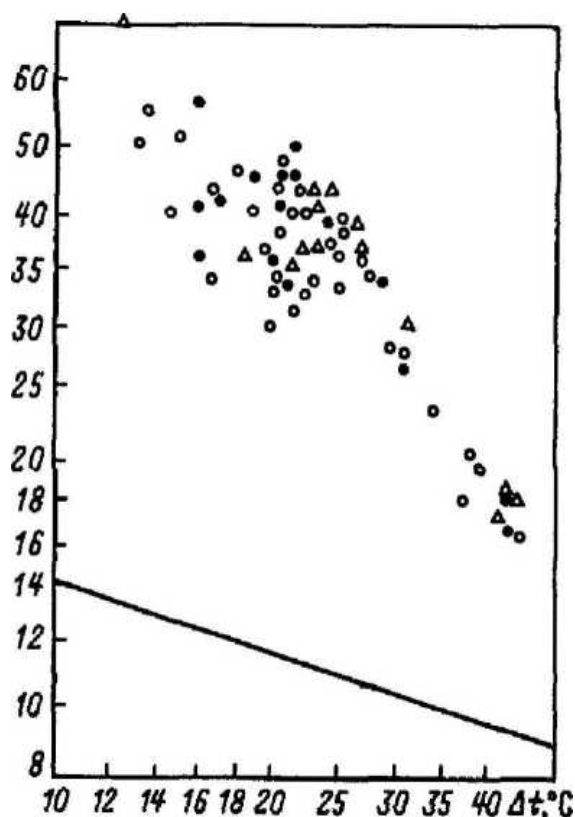


Рис. 5 Зависимость коэффициента теплоотдачи для трубы с параметрами: $d_n/D_n \sim 0,893$; $t/D_n = 0,37$; $R/D_n = 0,76$ и $R_0/d_n = 0,062$ от температурного напора при различном размещении труб в пучке: ○ - верхняя труба горизонтального пучка; Δ - вторая труба вертикального ряда; ● - третья труба вертикального ряда; — - теплообмен при конденсации на гладкой трубе

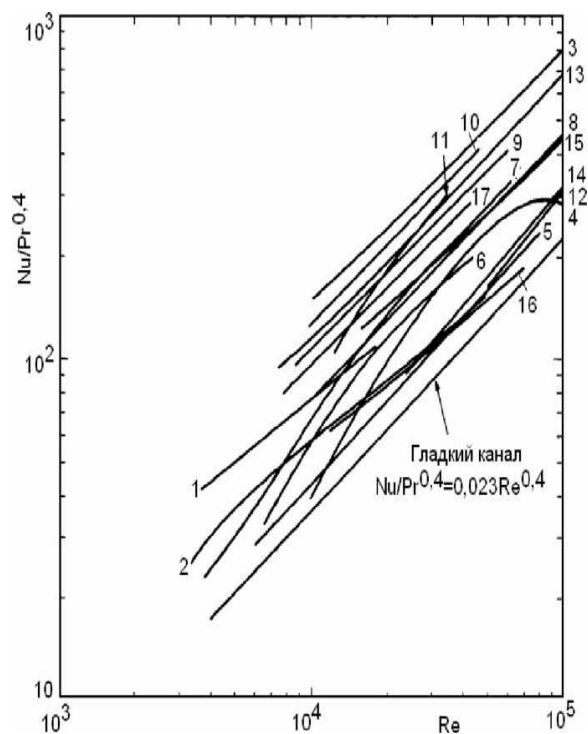


Рис. 6 Данные по теплоотдаче в трубах с шероховатыми стенками при течении воды [3]: 1 - спиральная проволочная вставка; 2 - накатка; 3 - высокие косые выступы; 4 - винтовая нарезка; 5 - винтовая нарезка; 6 - шероховатое покрытие; 7 низкие выступы; 8 - низкие выступы; 9 - низкие выступы; 10 - спиральные желобки; 11 - косые канавки; 12 - спиральные желобки; 13 - песочные зерна; 14 - спиральные желобки; 15 - косые канавки; 16 - низкие косые выступы; 17 - спиральная проволочная вставка

С целью обоснования выбора оптимальных параметров канавок и выступающих частей труб были проведены подробные экспериментальные исследования в широком диапазоне режимных и геометрических параметров.

По результатам проведенных экспериментов (Рис. 5), интенсификация теплоотдачи практически не зависит от температурного напора. Коэффициент теплоотдачи увеличивается в 1,8 – 2,65 раз, причем тем больше, чем больше глубина канавок, чем меньше их шаг и чем меньше радиус закругления выступающих частей труб R . Таким образом полученные опытные данные обобщаются зависимостью, подходящей для расчета коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве при конденсации на горизонтальных трубах с накаткой [2]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_{2л}} = 2,469 \left(1 - 0,2445 \frac{R}{D_H} \right) \left(1 - 0,379 \frac{t}{D_H} \right) \exp \left[3,65 \left(1 - \frac{d}{D_H} \right) \right] \quad (5)$$

МЕЖТРУБНОЕ ПРОСТРАНСТВО

С другой стороны, теплообмен со трубного пространства так же нельзя считать по то формулам для гладких труб. Использование накатки, являющейся одним из самых простых способов интенсификации теплоотдачи при турбулентном движении жидкости – увеличение шероховатости поверхности, способствует разрушению или возмущению вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя потока, что способствует повышению теплоотдачи. Структура шероховатости может являться как неотъемлемой частью теплообменной поверхности (равномерно нанесенные или дискретные двух- или трехмерные выемки и выступы и т.д.) или являться элементами проволочных или прочих вставок.

Шероховатые поверхности используются для интенсификации теплоотдачи при однофазных течениях в трубах, стержней и трубных пучков. Следует указать, что в настоящее время не удалось получить единой универсальной зависимости для расчета теплообмена и трения в шероховатых кольцевых каналах. Однако большое количество накопленных экспериментальных данных, с использованием различных методов увеличения шероховатости поверхностей (Рис. 6) позволяют получить общую зависимость коэффициента теплоотдачи внутри трубок, с использованием шероховатых поверхностей.

Так же, как и при гладких трубах коэффициент теплоотдачи определяется через безразмерное число Нуссельта, определяющее по соотношению [3]:

$$Nu = Nu_0 \left\{ 1 + \left[2,64 Re^{0,036} Pr^{0,024} a \cdot b \cdot c \right]^7 \right\}^{1/7} \quad (6)$$

Где,

$$a = \left(\frac{h}{D} \right)^{0,212} \quad (7)$$

$$b = \left(\frac{t}{D} \right)^{-0,21} \quad (8)$$

$$c = \left(\frac{\alpha}{90} \right)^{0,29} \quad (9)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при использовании накатанных труб при конденсации пара, удастся увеличить интенсивность теплообмена в 1,5 раза, в то время как среднее значение с использованием оребрения позволяет достичь увеличения интенсивности в процессах конденсации до 1,2 раза. Что может быть использовано в аппаратах глубокого охлаждения дымовых газов, для увеличения КПД котельных аппаратов.

Так же использование накатки позволяет уменьшить габариты теплоэнергетических агрегатов, за счет уменьшения площади теплообмена в сравнении с гладкими трубами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев В.Н. Тепломасообмен; Екатеринбург, УрФУ, 2013г
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 408 с.
3. Попов, И.А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография / И.А.Попов, Х.М.Махьянов, В.М.Гуреев; под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с